

VŠB – Technická Univerzita Ostrava  
Fakulta strojní  
Katedra energetiky

Návrh měření průtoku přehřáté páry a napájecí vody  
pomocí Venturiho trubice

Proposal of measurement of superheated steam  
and feed water flow  
using Ventura tube

Student:  
Vedoucí diplomové práce:

Ota Vaculík  
Ing. Michal Stáňa, PhD.

Ostrava 2010

VŠB - Technická univerzita Ostrava  
Fakulta strojní  
Katedra energetiky

## Zadání bakalářské práce

Student: **Ota Vaculík**  
Studijní program: **B2341 Strojírenství**  
Studijní obor: **3907R004 Provoz a řízení v energetice**  
Téma: **Návrh měření průtoku přehřáté páry a napájecí vody pomocí Venturiho trubice**  
**Proposal of Measurement of Superheated Steam and Feed Water Flow Using Venturi Tubes**

Zásady pro vypracování:

- 1) Porovnejte nejčastěji v energetice používané způsoby měření průtoku.
- 2) Porovnejte jednotlivé typy Venturiho trubice.
- 3) Navrhněte měření průtoku napájecí vody pomocí Venturiho trubice pro dva snímače diferenčního tlaku s různými rozsahy.
- 4) Navrhněte měření průtoku přehřáté páry pomocí Venturiho trubice pro dva snímače diferenčního tlaku s různými rozsahy.
- 5) Posuďte vhodnost použití termočlánku a odporového snímače teploty Pt100.
- 6) Porovnejte navržené varianty z hlediska ekonomického a z hlediska přesnosti měření

Seznam doporučené odborné literatury:

- [1] ČSN EN ISO 5167 – 1 Měření průtoku tekutin pomocí snímačů diferenčního tlaku vložených do zcela zaplněného potrubí kruhového průřezu – Část 1: Obecné principy a požadavky, Český normalizační institut, listopad 2003
- [2] ČSN EN ISO 5167 – 4 Měření průtoku tekutin pomocí snímačů diferenčního tlaku vložených do zcela zaplněného potrubí kruhového průřezu – Část 4: Venturiho trubice, Český normalizační institut, listopad 2003
- [3] BEJČEK, L., ĎAŘO, S., PLATIL, A. *Měření průtoku a výšky hladiny*, BEN 2006
- [4] KOČIŠ, Š., STÁNA, M., VILIMEC, L. *Provoz a regulace energetických zařízení*, VŠB 2007
- [5] [www.mattech.cz](http://www.mattech.cz)
- [6] [www.yokogawa.cz](http://www.yokogawa.cz)
- [7] [www.emersonprocess.cz](http://www.emersonprocess.cz)

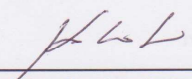
Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

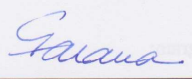
Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Michal Stáňa, PhD.**

Datum zadání: 18.12.2009

Datum odevzdání: 21.05.2010



  
prof. Ing. Pavel Kolat, DrSc.  
vedoucí katedry

  
prof. Ing. Radim Farana, CSc.  
děkan fakulty

### Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou bakalářskou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a uvedl jsem všechny podklady a literaturu.

V Ostravě: 20. 5. 2010




.....

podpis studenta

Prohlašuji, že

- jsem byl seznámen s tím, že na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě bakalářskou práci užít (§ 35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že bakalářská práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB-TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího bakalářské práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užití díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požádat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- beru na vědomí, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě: 20. 5. 2010

  
.....  
podpis

Jméno a příjmení autora práce: Ota Vaculík

Adresa trvalého pobytu autora práce: Ludvíkov 147, 793 26, Ludvíkov

### **Anotace Bakalářské práce**

VACULÍK, O. *Návrh měření průtoku přehřáté páry a napájecí vody pomocí dýz : bakalářská práce*. Ostrava : VŠB – Technická universita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra energetiky, 2010, 43 s. Vedoucí práce: Stáňa, M.

Hlavním tématem této bakalářské práce je měření průtoku. Jsou zde shrnuty nejčastěji využívané metody měření průtoku. V krátkém souhrnu měřících zařízení jsou základní metody stručně popsány a porovnány. Největší pozornost je věnována měřením pomocí škrtících orgánů, speciálně měřením pomocí Venturiho trubic.

Praktická část obsahuje návrh měření průtoku přehřáté páry a napájecí vody pomocí Venturiho trubic pro dva snímače diferenčního tlaku s různými rozsahy. Dále pak porovnávám měření při použití termočlánku a odporového snímače teploty Pt 100. V závěru jsou navržené varianty porovnány z ekonomického hlediska a z hlediska přesnosti měření.

### **Annotation of Bachelor thesis**

VACULÍK, O. *Proposal of the Measurement of the Superheated Steam and the Feed Water Flow Using the Nozzles : Bachelor Thesis*. . Ostrava : VŠB – Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical engineering, Department of Energetics, 2010, 43 s. Thesis head: Stáňa, M.

The main topic of this bachelor thesis is flow measurement and its most frequently used methods. The methods are described and compared in a short summary with the main focus on orifice meters, especially Venturi tubes. The practical part contains a concept of superheated steam measurement and feed water measurement by means of Venturi tubes for two sensors measuring pressure gap with different ranges. Using a thermojunction and a thermo- resistor Pt100 are compared further on. The conclusion includes a comparison of the proposed alternatives from the economical point of view as well as measurement accuracy.

### **Klíčová slova**

- měření průtoku
- škrtící orgány
- Clona
- Venturiho trubice
- Dýza

### **Keywords**

- flow measurement
- orifice meters
- Orifice
- Venturi tube
- Nozzle

1	Úvod.....	9
2	Termíny a definice .....	9
2.1	Měření tlaku .....	9
2.2	Proudění .....	9
2.3	Primární prvek.....	11
3	Použité značky a indexy .....	12
4	Způsoby měření tlaku.....	13
4.1	Měření rychlosti proudění tekutiny .....	13
4.1.1	Turbínkové průtokoměry.....	14
4.1.2	Vírové průtokoměry .....	14
4.1.3	Elektromagnetické průtokoměry .....	14
4.1.4	Ultrazvukové průtokoměry .....	14
4.2	Měření objemového průtoku .....	14
4.3	Měření hmotnostního průtoku.....	15
4.3.1	Coriolisův průtokoměr .....	15
4.3.2	Tepelný hmotnostní průtokoměr .....	15
4.4	Měření rozdílu tlaku před a za primárním prvkem průtokoměru.....	16
4.4.1	Clona .....	16
4.4.2	Venturiho trubice.....	17
4.4.3	Dýza .....	17
4.4.4	Pitotova trubice .....	18
4.4.5	Plováčkové průtokoměry.....	18
5	Venturiho trubice.....	19
5.1	Druhy Venturiho trubic v závislosti na způsobu jejich výroby:.....	19
5.1.1	Klasická Venturiho trubice s odlitým konfuzorem .....	19
5.1.2	Klasická Venturiho trubice s obrobeným konfuzorem.....	20
5.1.3	Klasická Venturiho trubice s plechovým svařovaným konfuzorem .....	20
5.1.4	Materiál a výroba .....	20
5.2	Obecný tvar Venturiho trubice .....	21
5.3	Jednotlivé části Venturiho trubice.....	22
5.3.1	Vstupní válec.....	22
5.3.2	Kuželovitý konfuzor.....	22
5.3.3	Hrdlo.....	22
5.3.4	Kuželovitý difuzor.....	22
5.4	Odběry tlaku .....	23
5.5	Součinitel průtoku C.....	23
5.5.1	Součinitel průtoku klasické Venturiho trubice s odlitým konfuzorem.....	23
5.5.2	Součinitel průtoku klasické Venturiho trubice s obrobeným konfuzorem.....	24
5.5.3	Součinitel průtoku klasické Venturiho trubice s plechovým svařovaným konfuzorem.....	24
5.6	Tlaková ztráta .....	24
5.7	Relativní tlaková ztráta.....	24
6	Zadané hodnoty pro výpočty .....	25
7	Návrh měření průtoku .....	25
7.1	Použité vzorce při návrhu Venturiho trubice pro napájecí vodu.....	25
7.1.1	Přepočet průměru v závislosti na teplotě.....	25
7.1.2	Poměr průměrů $\beta$ .....	25
7.1.3	Reynoldsovo číslo potrubí $Re_D$ .....	26
7.1.4	Reynoldsovo číslo clony nebo hrdla $Re_d$ .....	26
7.1.5	Hmotnostní průtok $q_m$ .....	26

7.1.6	Součinitel průtoku $C$ .....	26
7.1.7	Součinitel expanze $\varepsilon$ pro napájecí vodu .....	26
7.2	Použité vzorce při návrhu Venturiho trubice pro přehřátou páru.....	27
7.2.1	Součinitel expanze $\varepsilon$ pro přehřátou páru .....	27
7.2.2	Poměr tlaků $\tau$ .....	27
7.2.3	Izoentropický exponent $\kappa$ .....	27
7.3	Iterační výpočty pro měření průtoku napájecí vody.....	28
7.3.1	Výsledky iteračních výpočtů pro měření průtoku napájecí vody.....	28
7.3.2	Kontrola výsledků pro regulaci .....	28
7.3.3	Materiál Venturiho trubice pro měření průtoku napájecí vody.....	29
7.4	Iterační výpočty pro měření průtoku přehřáté páry.....	29
7.4.1	Výsledky iteračních výpočtů pro měření průtoku přehřáté páry.....	29
7.4.2	Kontrola výsledků pro regulaci .....	29
7.4.3	Materiál Venturiho trubice pro měření průtoku přehřáté páry .....	30
7.5	Výpočet trvalé tlakové ztráty ve Venturiho trubici.....	30
7.6	Návrh rozměrů Venturiho trubice .....	31
7.6.1	Návrh rozměrů Venturiho trubice pro měření průtoku napájecí vody .....	31
7.6.2	Návrh rozměrů Venturiho trubice pro měření průtoku přehřáté páry .....	31
7.7	Ukázka výpočtu měření průtoku napájecí vody v EES.....	32
7.7.1	Ukázka zadávání rovnic v EES .....	32
7.7.2	Ukázka zpřehlednění rovnic v EES.....	33
7.7.3	Ukázka výsledků řešení v EES.....	34
8	Posouzení vhodnosti termočlánku typu K a odporové sondy Pt 100.....	35
8.1	Měření termočlánkem typu K .....	35
8.2	Měření odporovou sondou Pt 100 .....	35
8.3	Celková nejistota hmotnostního průtoku.....	36
8.4	Závěrečné porovnání Termočlánku typu K a odporové sondy Pt 100.....	37
9	Ekonomické porovnání .....	38
10	Závěr.....	41
11	Seznam použité literatury .....	43
12	Seznam příloh.....	43



## 1 Úvod

Vodní pára je pro člověka, dnes již nepostradatelným, nositelem energie.

Využíváme ji k pohánění parních turbín, které se užívají především v energetice pro pohánění alternátorů vyrábějících elektrickou energii. Dále se dá použít např. pro pohon lodí (parník, jaderná ponorka, bitevní loď).

Pro přeměnu vody v páru a její následné přehřátí se užívají parní kotle, které jsou zásobeny napájecí vodou pomocí čerpadel. Napájecí voda je speciálně, za přísných podmínek, upravovaná a následně, v teplosměnných plochách kotle, transformovaná na páru.

Tlak, objem, teplota a průtok jsou veličiny na sobě přímo závislé. K efektivnímu a bezpečnému využití jak entalpie páry, tak napájecí vody, potřebujeme dosáhnout specifických stavových hodnot a tudíž i průtoku. K tomu je zapotřebí tyto veličiny měřit. Bakalářská práce se věnuje zejména měření jedné z těchto veličin – průtoku, pomocí jednoho z nejpoužívanějších škrtících orgánů – Venturiho trubice.

## 2 Termíny a definice

V následující kapitole jsou shrnuty základní pojmy používané v ČSN 5167 [1]

### 2.1 Měření tlaku

- Odběr tlaku ve stěně
  - o Prstencová, či kruhová dutina, která se do stěny potrubí vyvrtá tak, aby hrana dutiny lícovala s vnitřním povrchem potrubí
  - o Nejčastěji se jedná o kruhovou dutinu, ale v určitých případech můžeme použít prstencovou štěrbinu
- Statický tlak tekutiny proudící potrubím
  - o Tento tlak změříme, jakmile připojíme tlakoměr do odběru tlaku ve stěně
  - o Používáme jen hodnoty absolutního statického tlaku
- Diferenční tlak  $\Delta p$ 
  - o Rozdíl statických tlaků měřených v odběru tlaku ve stěně, přičemž jeden tlak je před primárním prvkem a druhý v hrdle Venturiho trubice
- Poměr tlaků  $\tau$ 
  - o Poměr absolutních, statických tlaků v odběru za a před primárním prvkem

### 2.2 Proudění

- Průtok  $q$ 
  - o Určuje objem, či hmotnost tekutiny, která proteče primárním prvkem za jednotku času
- Hmotnostní průtok  $q_m$ 
  - o Určuje hmotnost tekutiny, která proteče primárním prvkem za jednotku času
- Objemový průtok  $q_v$ 
  - o Určuje objem tekutiny, která proteče primárním prvkem za jednotku času
  - o K měření objemového průtoku musíme znát tlak a teplotu, ke které se objem vztahuje
- Reynoldsovo číslo  $Re$ 
  - o Bezrozměrový parametr, který vyjadřuje poměr mezi třecími a setrvačnými silami

- Reynoldsovo číslo potrubí  $Re_D$ 
  - o Bezrozměrový parametr, který vyjadřuje poměr mezi třecími a setrvačnými silami před primárním prvkem v potrubí
  - o K výpočtu Reynoldsova čísla v potrubí užíváme vzorec č. 1.

$$Re_D = \frac{V_1 \cdot D}{\nu_1} = \frac{4 \cdot q_m}{\pi \cdot \mu_1 \cdot D} \quad [1] \quad (1)$$

- Reynoldsovo číslo clony, nebo hrdla  $Re_d$ 
  - o Bezrozměrový parametr, který vyjadřuje poměr mezi třecími a setrvačnými silami přímo ve cloně, či v hrdle primárního prvku
  - o K výpočtu Reynoldsova čísla clony, nebo hrdla užíváme vzorec č. 2.

$$Re_d = \frac{Re_D}{\beta} \quad [1] \quad (2)$$

- Izoentropický exponent  $\kappa$ 
  - o Určuje relativní změnu hustoty k relativní změně tlaku za probíhající adiabatické (izoentropické) změny
- Součinitel průtoku  $C$ 
  - o Stanovuje se pro nestlačitelnou tekutinu
  - o Představuje poměr skutečného průtoku primárním prvkem k teoretickému průtoku
  - o V případě nestlačitelné tekutiny užíváme vzorec č. 3.

$$C = \frac{q_m \cdot \sqrt{1 - \beta^4}}{\frac{\pi}{4} \cdot d^2 \cdot \sqrt{2 \cdot \Delta p \rho_1}} \quad [1] \quad (3)$$

- Joule Thomsonův součinitel  $\mu_{JT}$ 
  - o Součinitel teplotně-tlakový, izoentalpický
  - o Rychlost změny teploty zohledňující tlak při konstantní entalpii
  - o Pro jeho výpočet užíváme vzorec č. 4 a 5

$$\mu_{JT} = \left. \frac{\partial T}{\partial p} \right|_H \quad [\text{K/Pa}] \quad (4)$$

Nebo

$$\mu_{JT} = \frac{R_u \cdot T^2}{p \cdot C_{m,p}} \cdot \left. \frac{\partial Z}{\partial T} \right|_p \quad [\text{K/Pa}] \quad (4)$$

Kde

$T$  je absolutní (termodynamická) teplota

$p$  statický tlak tekutiny proudící potrubím

$H$  entalpie

$R_u$  univerzální plynová konstanta

$C_{m,p}$  molární tepelná kapacita při konstantním tlaku

$Z$  faktor kompresibility

- Součinitel expanze  $\varepsilon$ 
  - o Nutný k výpočtu stlačitelnosti tekutiny
  - o K jeho výpočtu užíváme vzorec č. 6

$$\varepsilon = \frac{q_m \cdot \sqrt{1 - \beta^4}}{\frac{\pi}{4} \cdot d^2 \cdot C \cdot \sqrt{2 \cdot \Delta p \rho_1}} \quad [1] \quad (6)$$

- Střední aritmetická úchylka (drsnosti) profilu  $R_a$ 
  - o Střední aritmetická úchylka od střední čáry profilu

## 2.3 Primární prvek

- prvek jenž je vložen do kruhového potrubí (kterým plným průřezem protéká tekutina) za účelem zjištění průtoku tekutiny

### 3 Použité značky a indexy

- Použité značky a indexy jsou zaznamenány v tabulce č. 1

Tabulka č. 1 – použité značky a indexy

Značka	Veličina	Rozměr	Jednotka SI
C	Součinitel průtoku	bezrozměrový	1
$C_{m,p}$	molární tepelná kapacita při konstantním tlaku	$ML^2/T^2\Theta^1mol^1$	J/(mol·K)
d	průměr otvoru clony nebo hrdla za provozních podmínek	L	M
D	vnitřní průměr potrubí před (nebo vstupní průměr klasické trubice Venturiho) při provozních podmínkách	L	M
H	Entalpie	$ML^2/T^2mol^1$	J/mol
k	homogenní ekvivalentní drsnost	L	M
K	součinitel tlakové ztráty (poměr tlakové ztráty k dynamickému tlaku $\rho V^2/2$ )	bezrozměrový	1
I	vzdálenost odběrů tlaku	L	m
L	relativní vzdálenost odběrů tlaku ( $L=I/D$ )	bezrozměrový	-
p	absolutní statický tlak tekutiny	$M/L^1T^2$	kPa
$q_m$	hmotnostní průtok	$MT^{-1}$	kg/s
$q_v$	Objemový průtok	$L^3/T^1$	$M^3/s$
R	Poloměr	L	m
Ra	střední aritmetická úchylka drsnosti profilu	L	m
$R_u$	univerzální plynová konstanta	$ML^2/T^2\Theta^1mol^1$	J/(mol·K)
Re	Reynoldsovo číslo	bezrozměrový	1
$Re_D$	Reynoldsovo číslo vztažené k D	bezrozměrový	1
$Re_d$	Reynoldsovo číslo vztažené k d	bezrozměrový	1
t	teplota tekutiny	$\Theta$	°C
T	absolutní (termodynamická) teplota tekutiny	$\Theta$	K
U'	relativní nejistota	bezrozměrový	1
V	střední axiální rychlost tekutiny v potrubí	$L/T^1$	m/s
Z	faktor kompresibility	bezrozměrový	1
$\beta$	proměr průměrů ( $\beta = d/D$ )	bezrozměrový	1
$\gamma$	poměr měrných tepelných kapacit <sup>b</sup>	bezrozměrový	1
$\delta$	absolutní nejistota	<sup>c</sup>	<sup>c</sup>
$\Delta p$	Diferenční tlak	$M/L^1T^2$	kPa
$\Delta p_c$	tlaková ztráta vyvozená usměřovačem proudění	$M/L^1T^2$	kPa
$\Delta \omega$	tlaková ztráta vyvozená primárním prvkem	$M/L^1T^2$	kPa
$\varepsilon$	Součinitel expanze	bezrozměrový	1
$\kappa$	izoentropický exponent <sup>b</sup>	bezrozměrový	1
$\lambda$	Součinitel tření	bezrozměrový	1
$\mu$	dynamická viskozita tekutiny	$M/L^1T^{-1}$	Pa·s
$\mu_{JT}$	Joule Thomsonův koeficient	$M/LT^2\Theta$	K/Pa

Značka	Veličina	Rozměr	Jednotka SI
$\nu$	kinematická viskozita tekutiny	$L^2/T$	$M^2/s$
$\xi$	relativní tlaková ztráta	bezrozměrový	1
$\rho$	hustota tekutiny	$M/L^3$	$kg/m^3$
$\tau$	poměr tlaků	bezrozměrový	1
$\varphi$	celkový úhel difuzorové části	bezrozměrový	rad
<ul style="list-style-type: none"> <li>- a: <math>M</math> = hmotnost, <math>L</math> = délka, <math>T</math> = čas, <math>\Theta</math> = teplota</li> <li>- b: <math>\gamma</math> je poměr měrné tepelné kapacity při stálém tlaku k měrné tepelné kapacitě při stálém objemu. Pro ideální plyny poměr měrných tepelných kapacit a izoentropický exponent mají stejnou hodnotu. Tyto závisí na vlastnostech plynu.</li> <li>- c: Rozměry a jednotky jsou stejné jako příslušné veličiny.</li> </ul>			

- další použité značky jsou vyobrazeny v tabulce č. 2

Tabulka č. 2 – značky použitých veličin

Značka	Veličina	Jednotka SI
Pel	Elektrický výkon	MWh
Pel/rok	Elektrický výkon za rok	MWh
Pel/CZK	Elektrický výkon za rok vyčíslený v Kč	MWh
$\Psi_C$	nejistota součinitele průtoku	%
$\Psi_\varepsilon$	nejistota součinitele expanze	%

#### 4 Způsoby měření tlaku

Nejrozšířenější způsoby stanovení průtoku uváděné v [1], [2], [3], [6] vycházejí z následujících metod:

- Měření rychlosti proudění tekutiny
- Měření objemového průtoku
- Měření hmotnostního průtoku
- Měření rozdílu tlaku před a za primárním prvkem průtokoměru

Každá z těchto metod využívá jiných typů průtokoměrů.

##### 4.1 Měření rychlosti proudění tekutiny

U snímačů, které jsou založeny na měření rozdílu tlaků, je závislost kvadratická. Signál z výstupu rychlostních průtokoměrů je však lineárně závislý na průtoku. Tudíž se zde neobjevuje chyba u odmocňování.

- Turbínkové průtokoměry
- Vírové průtokoměry
- Elektromagnetické průtokoměry
- Ultrazvukové průtokoměry

#### **4.1.1 Turbínkové průtokoměry**

Rotor s lopatkami se otáčí vlivem proudění tekutiny, přičemž otáčky jsou úměrné rychlosti proudění tekutiny. Otáčky se snímají bezdotykovým indukčním snímačem. Napěťové impulsy vycházející ze snímače se dále zpracovávají a vyhodnocují

Turbínkové průtokoměry se používají v širokém rozsahu měřených rychlostí, převážně pro měření průtoku vody. Nejsou však doporučovány pro tekutiny, které při proudění v potrubí víří a pro tekutiny s velkou viskozitou. Turbínkové průtokoměry jsou náchylné na opotřebování a na usazování nečistot.

#### **4.1.2 Vírové průtokoměry**

Jsou založeny na von Karnamově efektu, kdy se při obtékání překážky oddělují po obou stranách víry.

Vírové průtokoměry jsou relativně necitlivé na změny teploty, tlaku a hustoty měřeného média. Mají malou tlakovou ztrátu a můžou se používat v rozsahu 20:1. Nelze je však použít při velmi malých rychlostech proudění

#### **4.1.3 Elektromagnetické průtokoměry**

Elektromagnetické průtokoměry fungují na základě Faradayova zákona elektromagnetické indukce. Pohybem tekutiny v homogenním magnetickém poli se indukuje elektrické napětí.

Takto můžeme měřit kapaliny elektricky vodivé i nemagnetické. Potrubí však musí být zcela zaplněno tekutinou. Průtokoměry se nevkládají do potrubí, proto nezpůsobují žádnou trvalou tlakovou ztrátu. Nemají žádné pohyblivé ztráty, tudíž nepodléhají opotřebením.

#### **4.1.4 Ultrazvukové průtokoměry**

Ultrazvukové průtokoměry využívají k měření rychlosti proudění tekutiny v potrubí ultrazvukové vlnění.

Tyto průtokoměry jsou, stejně jako elektromagnetické průtokoměry, bezkontaktní. Tím pádem nezpůsobují tlakovou ztrátu. Vzhledem k tomu, že neobsahují pohyblivé části, nehrozí ani opotřebením zařízení.

### **4.2 Měření objemového průtoku**

Tyto průtokoměry měří průtok tekutiny rozdělením objemu do samostatných prostor s námi definovaným objemem. Jakmile se vynásobí známý objem odměrného prostoru počtem naplněných prostor, získá se hodnota objemu tekutiny, která za určitou dobu protekla potrubím. Tyto průtokoměry ukazují celkový proteklý objem na počítadle. Výstupem však můžou být i impulsy odpovídající počtu naplněných prostor.

Objemové průtokoměry nejsou vhodné pro měření průtoku znečištěných kapalin, jelikož obsahují velké množství pohyblivých částí. Navíc způsobují tlakovou ztrátu. Jsou rovněž nevhodné pro měření průtoku plynů, jelikož nejdou spolehlivě utěsnit.

### **4.3 Měření hmotnostního průtoku**

Mimo nepřímého zjištění hmotnostního průtoku přepočtem z objemového průtoku existují i přímé metody měření. Základní metody jsou:

- Coriolisův průtokoměr
- Tepelný hmotnostní průtokoměr

#### **4.3.1 Coriolisův průtokoměr**

Ve vibrujících měřicích trubicích vzniká, při průtoku média, Coriolisova síla, kterou tento průtokoměr využívá. Coriolisovy průtokoměry měří velice přesně. Výstupní údaje jsou nezávislé na teplotě, tlaku, obsahu pevných částic v médiu, atd.

#### **4.3.2 Tepelný hmotnostní průtokoměr**

Vychází ze závislosti výměny tepla mezi okolím a zdrojem na hmotnostním průtoku. Existují dva hlavní typy průtokoměrů:

- termoanemometry
- kalorimetrické průtokoměry

##### **Termoanemometr**

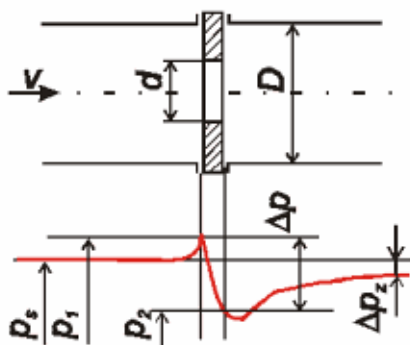
Je elektricky vyhřívaná sonda vložená do potrubí, které je zcela vyplněno tekutinou, která jím proudí. Množství tepla sondou odebíraného je závislé na hustotě, tepelné vodivosti, na rychlosti proudění a na teplotě proudícího média. Jako čidlo se používá platinový drátek, který se nažhaví na teplotu 200 až 500°C.

##### **Kalorimetrický průtokoměr**

U kalorimetrického průtokoměru se teplota snímá před a za zdrojem tepla, který je umístěn do středu proudového profilu.

#### 4.4 Měření rozdílu tlaku před a za primárním prvkem průtokoměru

Tento způsob měření využívá většina průmyslových průtokoměrů. Škrťící orgány (obrázek č. 4.1), do kterých řadíme Clony, Dýzy, Venturiho trubice, atd., patří mezi základní prostředky k měření průtoku. Další průtokoměry, založené na měření rozdílu tlaku jsou rychlostní sondy (Pitotova trubice, Prandtlůva trubice a jiné), plováčkové průtokoměry, atd.



Kde:

$v$  – rychlost proudění

$d$  – průměr otvoru škrťícího orgánu

$D$  – průměr potrubí

$p_s$  – vstupní statický tlak

$p_1$  – snímaný tlak před škrťícím orgánem

$p_2$  – snímaný tlak za škrťícím orgánem

$\Delta_p$  – diferenční tlak ( $p_1 - p_2$ )

$\Delta_{pz}$  – trvalá tlaková ztráta

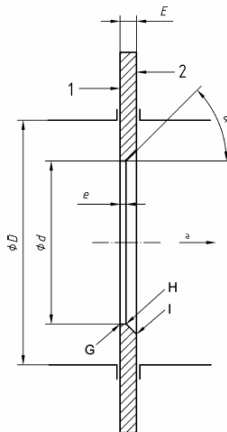
Obrázek č. 4.1 – Měření rozdílu tlaků [3]

- Clona
- Venturiho Trubice
- Dýza
- Pitotova trubice
- Plováčkové průtokoměry

##### 4.4.1 Clona

Clona (obrázek č. 4.2) je plochá kovová destička s otvorem, kterou vložíme do potrubí mezi příruby. Umístění škrťícího otvoru, jakož i jeho průměr závisí na typu měřené tekutiny. Existují tři základní typy odběrů – koutové odběry a přírubové odběry a měření ve vzdálenosti  $D$  a  $D/2$  od přední strany clony.

Uvažujeme čtyři základní typy clon: soustředná (normalizovaná), excentrická segmentová a víceotvorová. Průtokoměry využívající ke svému měření clonu jsou poměrně pevné a odolné, zároveň jsou relativně levné při velkých průměrech potrubí. Jelikož jsou clony náchylné k opotřebení, které se projevuje při proudění znečištěných tekutin, či tekutin s částicemi, používáme je pouze k měření průtoku čistých tekutin. Pro přesnost měření se musí clona zabudovat do přímého úseku potrubí s přesně definovanými uklidňujícími úseky proudění před a za clonou.

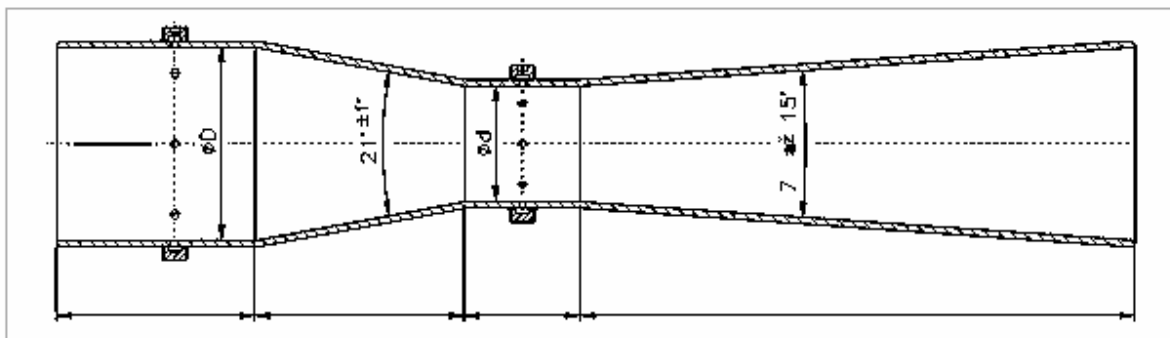


Obrázek č. 4.2 – Clona [3]



#### 4.4.2 Venturiho trubice

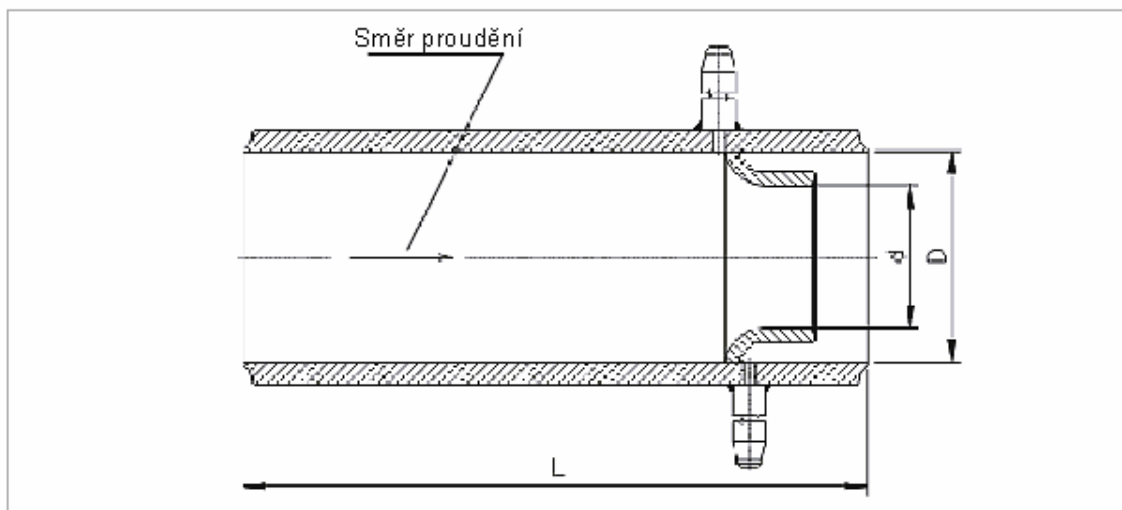
Venturiho trubice (obrázek č. 4.3) se využívá poměrně málo skrze svou vysokou cenu. Mezi její nesporné klady však patří především menší tlaková ztráta, než u clony. Venturiho trubice se však vykazuje vyšší odchylkou v přesnosti měření. Uvnitř kuželového konfuzoru se zrychlí tekutina, díky tomu klesne v daném místě statický tlak. Dále tekutina pokračuje do difuzoru. Zde se tlak vrátí téměř na úroveň tlaku před konfuzorem.



Obrázek č. 4.3 – Venturiho trubice [3]

#### 4.4.3 Dýza

Dýzy (obrázek č. 4.4) jsou levnější než Venturiho trubice, ale způsobují větší tlakovou ztrátu a vykazují menší přesnost měření. Dýzami můžeme měřit větší průtoky než clonami a zároveň můžeme měřit průtok u tekutin s výskytem větších pevných částic. Dýza je kompromis mezi Venturiho trubicí a clonou. Neobsahuje difuzor.



Obrázek č. 4.4 – Dýza [3]

#### **4.4.4 Pitotova trubice**

Hlavním měřicím prvkem je tenká trubička otočená ústím proti směru proudění tekutiny. Pitotovy trubice se používají nejčastěji k měření průtoku velmi čistých kapalin, nebo k měření průtoku plynů, kvůli možnému zanesení malých otvorů trubice snímajících tlak. Přesnost měření závisí na rychlostním profilu proudění. Pitotova trubice je jednou z nejstarších a nejjednodušších rychlostních sond určených pro měření průtoku tekutiny.

#### **4.4.5 Plováčkové průtokoměry**

Svislá kónická měřicí trubice tvoří základ Plováčkových průtokoměrů. Rozšiřuje se směrem nahoru a pohybuje se v ní plováček, přičemž je hustota měřené tekutiny nižší, než hustota materiálu, ze kterého je plováček vyroben. Plováček je v tekutině dole, dokud nezačne tekutina proudit, pak se začne plováček zvedat. Při určitém průtoku zaujme plováček rovnovážnou polohu s takovou plochou mezikruží, při níž je síla nadnášející plováček právě rovna gravitační síle, kterou na něj působí zemská přitažlivost. Zdvih plováčku je úměrný rychlosti proudění.

## 5 Venturiho trubice

V této kapitole bylo čerpáno z následujících zdrojů: [1] [2] [3] [4]

Venturiho trubice se velmi málo využívá pro svou vysokou cenu a nižší přesnost, avšak vyniká menší tlakovou ztrátou oproti ostatním škrticím orgánům.

Tento škrticí orgán se zabuduje do potrubí, v němž plným průřezem protéká tekutina. Mezi předním úsekem a hrdlem Venturiho trubice je rozdíl statických tlaků. Pakliže je Venturiho trubice geometricky podobná trubici kalibrované a jestliže jsou stejné podmínky použití, můžeme průtok stanovit právě z těchto naměřených hodnot tlakového rozdílu a ze znalosti podmínek proudění.

### 5.1 Druhy Venturiho trubice v závislosti na způsobu jejich výroby:

- Klasická Venturiho trubice s odlitým konfuzorem
- Klasická Venturiho trubice s obrobeným konfuzorem
- Klasická Venturiho trubice s plechovým svařovaným konfuzorem

#### 5.1.1 Klasická Venturiho trubice s odlitým konfuzorem

Tato trubice se vyrábí odlitím do pískové formy, či jinými způsoby, které zanechají stav konfuzoru obdobný, jaký vzniká litím do písku. Hrdlo i přechody mezi válcovými a kuželovitými částmi jsou opracované a zaoblené.

Konfuzor je vyroben litím do písku a je neobrobený. Z vnitřní strany konfuzoru nesmí být žádné výrobní vady (praskliny, trhliny, prohlubeniny, nepravidelnosti, nečistoty, atd.). Parametr drsnosti  $R_a$  je menší, než  $10^{-4} D$ .

Minimální délka vstupního válce je menší, nebo rovna těmto hodnotám:

- D
- 0,25D + 250mm

Jestliže je povrch vstupního válce stejný, jako u konfuzoru, nemusí se opracovávat.

Válcovitá část hrdla nesmí být kratší, než je třetina jejího průměru  $d$ . Poloměr zaoblení  $R_3$  volíme mezi  $5d$  a  $15d$ . Doporučuje se však hodnota střední, blízká  $10d$ .

Klasické Venturiho trubice s odlitým konfuzorem se používají v potrubích o průměru mezi 100 mm a 800 mm, přičemž se poměr průměrů  $\beta$  pohybuje mezi 0,3 a 0,75.

### **5.1.2 Klasická Venturiho trubice s obrobeným konfuzorem**

Tato trubice se vyrábí stejně jako trubice s odlitým konfuzorem (5.1.1). Konfuzor, hrdlo a vstupní válec této trubice se však obrobí.

Vstupní válec nesmí být kratší, než jeho průměr  $D$ . Musí mít stejnou povrchovou úpravu, jako hrdlo.

Poloměr zaoblení  $R_1$  musí být co nejmenší. Maximálně  $0,25D$ .

Poloměry zaoblení  $R_2$  a  $R_3$  musí být co nejmenší. Maximálně  $0,25d$ .

Klasické Venturiho trubice s obrobeným konfuzorem se používají v potrubích o průměru mezi 50 mm a 250 mm, přičemž se poměr průměrů  $\beta$  pohybuje mezi 0,4 a 0,75.

### **5.1.3 Klasická Venturiho trubice s plechovým svařovaným konfuzorem**

Tato trubice se vyrábí svařováním. Trubice velkých rozměrů se nemusí obrábět, ale je třeba dodržet určitou toleranci. U menších rozměrů se obrábí hrdlo.

Vstupní válec nesmí být kratší, než jeho průměr  $D$ . Musí mít stejné parametry povrchu jako konfuzor, bez okují a strusky po svařování, s drsností povrchu cca.  $5 \times 10^{-4}$ .

Konfuzor nesmí mít ve spojení se vstupním hrdlem, ani s hrdlem žádné jiné zaoblení, než to vzniklé svařením součástí.

Spojení hrdla s difuzorem nesmí obsahovat žádné zaoblené spojení.

Klasické venturiho trubice s plechovým svařovaným konfuzorem se používají v potrubích o průměru mezi 200 mm a 1200 mm, přičemž se poměr průměrů  $\beta$  pohybuje mezi 0,4 a 0,7.

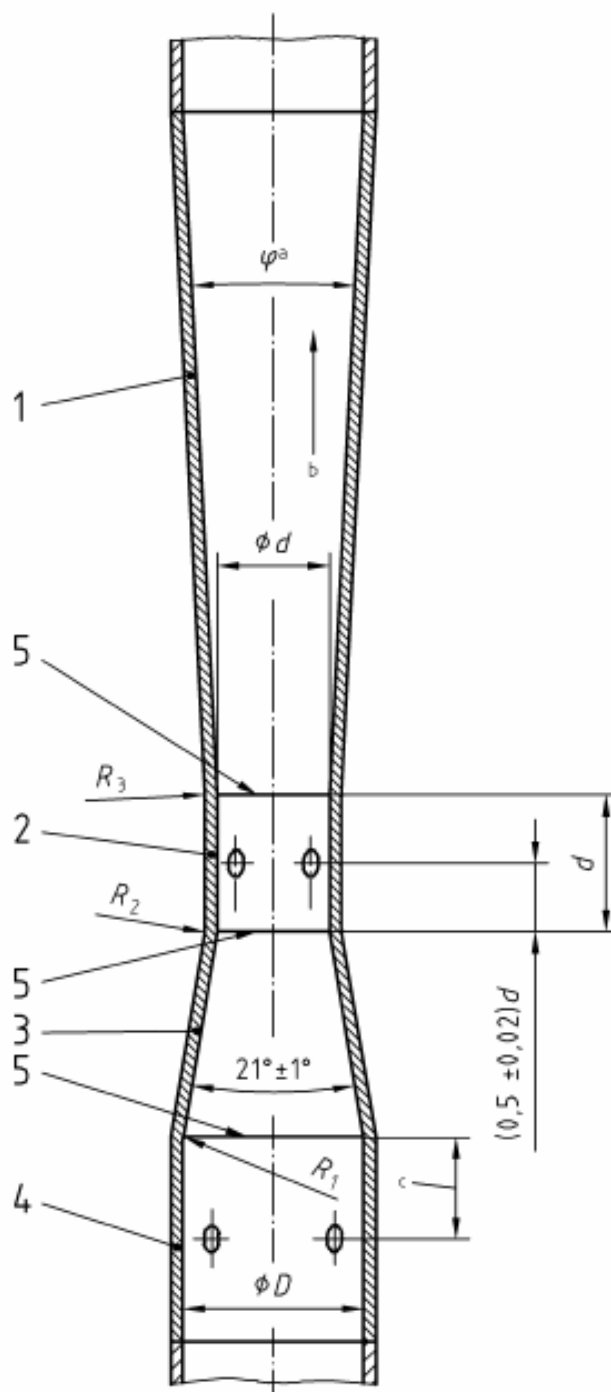
### **5.1.4 Materiál a výroba**

Klasická Venturiho trubice může být vyrobena z jakýchkoliv materiálů, pakliže i při použití odpovídají požadovaným parametrům. Konfuzor a hrdlo mohou být vyrobeny z jednoho kusu materiálu. Jestliže jsou vyrobeny ze dvou kusů, musí se smontovat ještě před obrobením vnitřního povrchu.

Speciální nároky se kladou na usazení difuzoru na hrdlo. Mezi jejich průměry nesmí být žádný stupňovitý přechod.

## 5.2 Obecný tvar Venturiho trubice

Obecný tvar Venturiho trubice s rozdělením na základní součásti jsou uvedeny na obrázku č. 5.1.



Obrázek č. 5.1 - Obecný tvar Venturiho trubice [2]

- 1 Kuželovitý difuzor
- 2 Válcovité hrdlo
- 3 Kuželovitý konfuzor
- 4 Vstupní válec
- 5 Spojovací roviny

### **5.3 Jednotlivé části Venturiho trubice**

#### **5.3.1 Vstupní válec**

Doporučená délka vstupního válce klasické Venturiho trubice je rovna jeho průměru,  $D$ . Průměr  $D$  se měří v rovině předních odběrů tlaku i v jiných rovinách. Žádný průměr nesmí být odlišný od střední hodnoty průměru o více než 0,4%.

#### **5.3.2 Kuželovitý konfuzor**

Na širší (přední) straně je omezen rovinou průniku komolého kužele konfuzoru se vstupním hrdlem, přičemž jsou tyto součásti navzájem propojeny zaoblením o poloměru  $R_1$ . Velikost zaoblení závisí na použitém typu Venturiho trubice. Na užší (zadní) straně je omezen rovinou průniku komolého kužele konfuzoru s hrdlem. Ke kontrole správnosti profilu se využívá šablony.

Vrcholový úhel kuželovitého konfuzoru musí být  $21^\circ \pm 1^\circ$ . Jeho celková délka, která se měří rovnoběžně s osou Venturiho trubice, se rovná  $2,7 \cdot (D-d)$ .

#### **5.3.3 Hrdlo**

Hrdlo má tvar válce s průměrem  $d$ . Hrdlo je omezeno komolým kuželem konfuzoru na přední straně a komolým kuželem difuzoru na straně zadní. Konfuzor je s hrdlem propojen zaoblením  $R_2$ . Difuzor je s hrdlem propojen zaoblením  $R_3$ . Hodnoty  $R_2$  a  $R_3$  jsou závislé na zvoleném typu klasické Venturiho trubice a kontrolují se šablonou.

Délka hrdla je rovna, pro jakýkoliv typ klasické Venturiho trubice,  $d \pm 0,03d$ .

U hrdla je velký důraz kladen na přesnost průměru  $d$ . Ten se měří velice pečlivě v rovině odběrů tlaku v hrdle, ale také v jiných rovinách. Žádný průměr nesmí být odlišný od střední hodnoty průměru o více než 0,1%.

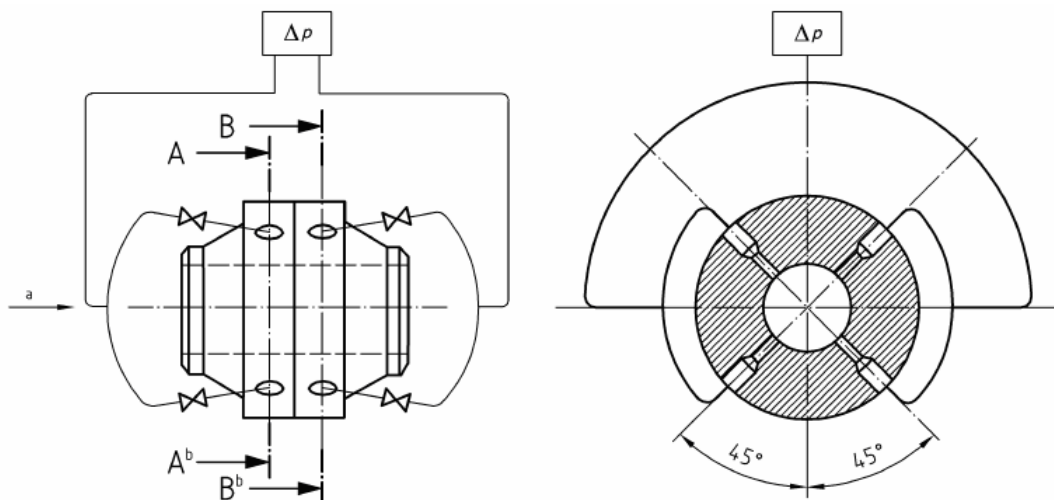
Hrdlo musí mít po celé své délce ekvivalentní drsnost povrchu.

#### **5.3.4 Kuželovitý difuzor**

Doporučený rozměr vrcholového úhlu  $\varphi$  je mezi  $7^\circ$  a  $8^\circ$ , ale smí se použít vrcholový úhel v rozmezí  $7^\circ$  a  $15^\circ$ . Nejmenší průměr difuzoru nesmí být menší, než průměr hrdla.

## 5.4 Odběry tlaku

Tlak se odebírá před klasickou Venturiho trubicí a v jejím hrdle. Musí být provedeny samostatné odběry ve stěně potrubí, které jsou propojeny prstencovými komorami, nebo piezometrickými prstenci. Jestliže existují čtyři odběry, je nejvhodnější uspořádání odběrů do „třech T“, viz obrázek č. 5.2.



Obrázek č. 5.2 – Uspořádání do třech T [1]

Odběry tlaku by měly být co nejmenší. Jejich velikost závisí na vlastnostech proudící tekutiny (viskozita, čistota, atd.). Odběry tlaku před klasickou Venturiho trubicí a v hrdle jsou minimálně čtyři a jsou na ně kladeny stejné požadavky. Osy odběrů tlaku protínají osu klasické Venturiho trubice, leží v rovinách kolmých na osu klasické Venturiho trubice a zároveň svírají navzájem stejné úhly.

Otvor v místě vyústění odběru tlaku je kruhový. Odběry tlaku jsou válcovité minimálně na délce 2,5 násobku vnitřního průměru odběru.

## 5.5 Součinitel průtoku C

Součinitel průtoku závisí na hodnotách  $D$ ,  $\beta$  a  $Re_D$ . Pakliže tyto tři veličiny nabývají extrémních hodnot, zvyšují se tím nejistoty součinitele průtoku, jejichž velikost je závislá na použitém typu klasické Venturiho trubice.

### 5.5.1 Součinitel průtoku klasické Venturiho trubice s odlitým konfuzorem

Hodnota součinitele průtoku u klasických Venturiho trubic s odlitým konfuzorem se určuje v určitém rozmezí podmínek:

$$100 \text{ mm} \leq D \leq 800 \text{ mm}$$

$$0,4 \leq \beta \leq 0,75$$

$$2 \times 10^5 \leq Re_D \leq 2 \times 10^6$$

$$C = 0,984$$

### 5.5.2 Součinitel průtoku klasické Venturiho trubice s obrobeným konfuzorem

Hodnota součinitele průtoku u klasických Venturiho trubic s obrobeným konfuzorem se určuje v určitém rozmezí podmínek

$$\begin{aligned}50 \text{ mm} &\leq D \leq 250 \text{ mm} \\0,4 &\leq \beta \leq 0,75 \\2 \times 10^5 &\leq Re_D \leq 1 \times 10^6 \\C &= 0,995\end{aligned}$$

### 5.5.3 Součinitel průtoku klasické Venturiho trubice s plechovým svařovaným konfuzorem

Hodnota součinitele průtoku u klasických Venturiho trubic s plechovým svařovaným konfuzorem se určuje v určitém rozmezí podmínek

$$\begin{aligned}200 \text{ mm} &\leq D \leq 1200 \text{ mm} \\0,4 &\leq \beta \leq 0,7 \\2 \times 10^5 &\leq Re_D \leq 2 \times 10^6 \\C &= 0,985\end{aligned}$$

## 5.6 Tlaková ztráta

Ke zjištění tlakové ztráty je nutné znát tlak před a po instalaci Venturiho trubice do systému.

Zřídí se dva odběry tlaku, přičemž jeden bude ve vzdálenosti přibližně  $D$  před a druhý bude ve vzdálenosti  $6D$  za plánovaným umístěním Venturiho trubice do systému. Před zabudováním Venturiho trubice se změří rozdíl tlaků  $\Delta p'$ . Po zabudování Venturiho trubice se změří rozdíl tlaků  $\Delta p''$ . Tlaková ztráta se poté vypočítá jako rozdíl tlaku po a před zabudováním primárního prvku:  $\Delta p'' - \Delta p'$ .

## 5.7 Relativní tlaková ztráta

Relativní tlaková ztráta  $\xi$  se vztahuje k diferenčnímu tlaku  $\Delta p$ , viz Vzorec č. 7:

$$\xi = \frac{\Delta p'' - \Delta p'}{\Delta p} \quad [1] \quad (7)$$



## 6 Zadané hodnoty pro výpočty

- hodnoty potřebné pro výpočty jsou uvedeny v tabulce č. 2

Tabulka č. 2 – Zadané hodnoty

	$p_1$ [MPa]	$t_1$ [C]	$D_{20}$ [mm]	$\alpha_d$ [1/K]	$Q$ [t/h]	$\alpha_D$ [1/K]
<b>Přehřátá pára</b>	18,1	575	213	14,625 E-6	300	14,625 E-6
<b>Napájecí voda</b>	22	249	267,9	13,145 E-6	560	13,145 E-6

Kde

- $D_{20}$  je průměr potrubí při 20 C
- cílem je určit průměr  $d_{20}$  [mm] = průměr hrdla Venturiho trubice
- výpočty se nejprve provedou pro průtok o hodnotě 110% zadané veličiny, z důvodu možného přesazení maximálního výkonu elektrárny – zároveň se v každém měření uvažují dvě hodnoty diferenčního tlaku  $\Delta p$  – 350 a 60 [kPa] – tzn. že bude dosaženo dvou výsledků pro každé měřené médium
- po zisku průměru hrdla Venturiho trubice se provedou výpočty právě pro tyto průměry při regulovaném průtoku na 40%, což je maximální možná regulace průtoku v elektrárně – v těchto výpočtech jde především o kontrolu normovaných veličin Venturiho trubice a zisk diferenčního tlaku, který bude sloužit jako spodní hranice měřicího zařízení

## 7 Návrh měření průtoku

- k iteračnímu výpočtu se využije program Engineering Equation Solver (EES)

### 7.1 Použité vzorce při návrhu Venturiho trubice pro napájecí vodu

#### 7.1.1 Přepočet průměru v závislosti na teplotě

- vlivem vysokých teplot se potrubí mírně roztáhne – k přepočtu průměru potrubí a hrdla Venturiho trubice se využije vzorce č. 8 a 9.

$$D = D_{20} \cdot (1 + \alpha \cdot (t_1 - 20)) \quad [\text{mm}] \quad (8)$$

$$d = d_{20} \cdot (1 + \alpha \cdot (t_1 - 20)) \quad [\text{mm}] \quad (9)$$

#### 7.1.2 Poměr průměrů $\beta$

- volba vhodného škrticího orgánu přímo závisí na hodnotě této veličiny, která se vypočítá, jako poměr průměru hrdla, ku průměru potrubí, dle vzorce č. 10
- poměr průměrů se u klasických Venturiho trubic pohybuje v tomto rozmezí:

$$0,3 < \beta < 0,75$$

$$\beta = \frac{d}{D} \quad [1] \quad (10)$$

### 7.1.3 Reynoldsovo číslo potrubí $Re_D$

- volba vhodného škrticího orgánu přímo závisí na hodnotě této veličiny, která vypočítá užitím vzorce č. 1
- Reynoldsovo číslo mění hodnotu součinitele průtoku  $C$  a nejistotu měření

### 7.1.4 Reynoldsovo číslo clony nebo hrdla $Re_d$

- vypočítáme dle vzorce č. 2

### 7.1.5 Hmotnostní průtok $q_m$

- hmotnostní průtok se vypočítá podle vzorce č. 11

$$q_m = \frac{C}{\sqrt{1-\beta^4}} \cdot \varepsilon \cdot \frac{\pi}{4} \cdot d^2 \cdot \sqrt{2 \cdot \Delta p \cdot \rho} \quad [\text{kg/s}] \quad (11)$$

Kde

$\rho$  - hustota napájecí vody při tlaku  $p_1$  a teplotě  $t_1$

### 7.1.6 Součinitel průtoku $C$

- pro Venturiho trubici se součinitel průtoku volí na základě  $\beta$ ,  $Re_D$ ,  $Re_d$  a  $D$
- vzhledem k vysokým hodnotám Reynoldsova čísla ve výpočtu, bylo nutno zvolit hodnotu součinitele průtoku z tabulky č. 3 [2]

Tabulka č. 3 – Hodnoty součinitele průtoku  $C$  a nejistoty v závislosti na  $Re_d$

$Re_d$	$C$	Nejistota [%]
$5 \times 10^4$	0,970	3
$1 \times 10^5$	0,977	2,5
$2 \times 10^5$	0,992	2,5
$3 \times 10^5$	0,998	1,5
$5 \times 10^5$ až $10^6$	0,995	1
$10^6$ až $2 \times 10^6$	1,000	2
$2 \times 10^6$ až $10^8$	1,010	3

- tyto hodnoty jsou reálné pouze pro Klasickou Venturiho trubici s obrobeným konfuzorem

### 7.1.7 Součinitel expanze $\varepsilon$ pro napájecí vodu

- pro kapalinu  $\varepsilon = 1$  [1]

## 7.2 Použité vzorce při návrhu Venturiho trubice pro přehřátou páru

- návrh Venturiho trubice pro přehřátou páru se od návrhu pro napájecí vodu liší pouze při výpočtu součinitele expanze

### 7.2.1 Součinitel expanze $\varepsilon$ pro přehřátou páru

- součinitel expanze pro přehřátou páru se musí vypočítat dle vzorce č. 12

$$\varepsilon = \sqrt{\left(\frac{\kappa \cdot \tau^{\frac{2}{\kappa}}}{\kappa - 1}\right) \cdot \left(\frac{1 - \beta^4}{1 - \beta^4 \cdot \tau^{\frac{2}{\kappa}}}\right) \cdot \left(\frac{1 - \tau^{\frac{(\kappa-1)}{\kappa}}}{1 - \tau}\right)} \quad [1] \quad (12)$$

Kde

$\tau$  – poměr tlaků před a za primárním prvkem

$\kappa$  – izoentropický exponent

### 7.2.2 Poměr tlaků $\tau$

- poměr tlaků se vypočítá jako podíl tlaku před a za Venturiho trubicí dle vzorce č. 13

$$\tau = \frac{p_1}{p_2} \quad [1] \quad (13)$$

### 7.2.3 Izoentropický exponent $\kappa$

- izoentropický exponent pro páru byl nalezen po dosazení tlaku a teploty páry [4]
- způsob vyhledání izoentropického exponentu je zachycen na obrázku č. 7.1

Pressure	<input type="text" value="18100"/>	<input type="text" value="kPa (kN/m²) absolute"/>
Superheat Temperature	<input type="text" value="575"/>	<input type="text" value="°C"/>
<div>Calculate Reset Print</div>		
Isentropic Coefficient (k)		<input type="text" value="1.29242"/>

Obrázek č. 7.1 – izoentropický exponent [4]

$$\kappa = 1,292 \quad [1]$$

### 7.3 Iterační výpočty pro měření průtoku napájecí vody

- při výpočtu se postupuje dle 7.1
- průměr hrdla  $d[\text{mm}]$  byl zjišťován pro 110% průtok  $q_{m110\%} = 172,1[\text{kg/s}]$  a pro dvě hodnoty diferenčního tlaku  $\Delta p - 350$  a  $60 [\text{kPa}]$

#### 7.3.1 Výsledky iteračních výpočtů pro měření průtoku napájecí vody

- výsledky iteračních výpočtů pro změření průměru hrdla pro průtok napájecí vody Venturiho trubici jsou zaznamenány v tabulce č. 4
- zbylé hodnoty pro výpočet jsou vyčteny z tabulky č. 2 z řádku určenému napájecí vodě

Tabulka č. 4 – Výsledky výpočtů pro měření průtoku napájecí vody

$\Delta p$	$q_{m110\%}$	$\beta$	$Re_D$	$Re_d$	$d$	$d_{20}$	$\psi_C$	$\Psi_\varepsilon$	$\Delta\omega$
350	171,111	0,352	7,28E+06	2,78E+07	94,538	94,254	3	0,064	45,5
60	171,111	0,537	7,28E+06	1,36E+07	144,321	144,321	3	0,013	6,36

Kde

- $\Psi_\varepsilon$  je nejistota součinitele expanze, která se spočítá dle vzorce č. 14

$$\Psi_\varepsilon = (4 + \beta^8) \cdot \frac{\Delta p}{p_1} \quad [\%] \quad (14)$$

- $\psi_C$  [%] je nejistota součinitele průtoku, která je daná pro Reynoldsovo číslo hrdla v tabulce č. 3
- nejdůležitější jsou hodnoty  $\beta$ ,  $Re_D$  a  $d_{20}$
- jelikož je hodnota Reynoldsova čísla pro potrubí ( $Re_D$ ) příliš vysoká, je nutné se orientovat dle Reynoldsova čísla hrdla, které v tomto případě může dosahovat až hodnoty  $10^8$  [1]
- $\Delta\omega$  [kPa] je hodnota trvalé tlakové ztráty

#### 7.3.2 Kontrola výsledků pro regulaci

- vypočítané průměry hrdla  $d$  [mm] se zkontrolují při užití identických vzorců pro regulovaný průtok 40% zadané hodnoty -  $q_{m40\%} = 62,2[\text{kg/s}]$
- hodnoty pro kontrolu jsou vyčteny z tabulky č. 4
- výsledky kontroly jsou zaznamenány v tabulce č. 5

Tabulka č. 5 – kontrola výsledků pro regulaci

$d$	$d_{20}$	$q_m$	$\beta$	$Re_D$	$Re_d$	$\Delta p$	$\psi_C$	$\Psi_\varepsilon$
94,538	94,254	62,222	0,352	2,65E+06	7,52E+06	45,277	1,01	0,008
144,321	144,888	62,222	0,537	2,65E+06	4,93E+06	7,933	1,01	0,002

- diferenční tlak  $\Delta p$  určuje dolní hranici pro rozsah užitého zařízení pro měření diferenčního tlaku
- hodnoty  $\beta$  a  $Re_D$  nepřesahují hodnoty určené normou [2], tudíž budou Venturiho trubice s těmito vypočtenými parametry vhodné pro měření průtoku napájecí vody dle zadaných hodnot

### 7.3.3 Materiál Venturiho trubice pro měření průtoku napájecí vody

- materiály vhodné pro měření průtoku napájecí vody daných parametrů jsou tyto: oceli třídy 15110, 15111, 145126, 15223, 15226
- povětšinou se materiál škrťácího orgánu volí stejný, jako materiál potrubí – v tomto případě se může použít některá z výše uvedených ocelí

### 7.4 Iterační výpočty pro měření průtoku přehřáté páry

- při výpočtu se postupuje dle 7.1 a 7.2
- průměr hrdla  $d$  [mm] se zjišťuje pro 110% průtoku  $= q_{m110\%} = 91,667$  [kg/s] a pro dvě hodnoty diferenčního tlaku  $\Delta p$  – 350 a 60 [kPa]

#### 7.4.1 Výsledky iteračních výpočtů pro měření průtoku přehřáté páry

- výsledky iteračních výpočtů pro změření průměru hrdla pro průtok napájecí vody Venturiho trubicí jsou zaznamenány v tabulce č. 6
- zbylé hodnoty pro výpočet jsou vyčteny z tabulky č. 2 z řádku určenému přehřáté páře

Tabulka č. 6 – výsledky výpočtů pro měření průtoku přehřáté páry

$\Delta p$	$q_{m110\%}$	$\beta$	$Re_D$	$Re_d$	$d$	$d_{20}$	$\psi_C$	$\psi_\varepsilon$	$\Delta\omega$
350	91,667	0,625	1,66E+07	2,65E+07	134,127	133,047	3	0,122	26,95
60	91,667	0,844	1,66E+07	1,96E+07	181,182	179,723	3	0,098	-

- $\psi_\varepsilon$  je nejistota součinitele expanze, spočítaná dle vzorce č. 14
- $\psi_C$  [%] je nejistota součinitele průtoku, která je daná pro Reynoldsovo číslo hrdla v tabulce č. 3
- nejdůležitější jsou hodnoty  $\beta$ ,  $Re_D$  a  $d_{20}$
- jelikož je hodnota Reynoldsova čísla pro potrubí  $Re_D$  příliš vysoká, je nutné se orientovat dle Reynoldsova čísla hrdla  $Re_d$ , které v tomto případě může dosahovat až hodnoty  $10^8$  [1]
- druhý řádek výsledků ukazuje, že hodnota poměru průměrů  $\beta$  je příliš vysoká – pro  $\Delta p = 60$  [kPa] a  $q_m = 99,99$  [kg/s] při daných parametrech není Venturiho trubice vhodným škrťácím orgánem
- $\Delta\omega$  [kPa] je hodnota trvalé tlakové ztráty

#### 7.4.2 Kontrola výsledků pro regulaci

- vypočítané průměry hrdla  $d$  [mm] je nutné zkontrolovat při užití identických vzorců pro regulovaný průtok 40% zadané hodnoty -  $q_{m40\%} = 33,33$  [kg/s]
- hodnoty pro kontrolu jsou vyčteny z tabulky č. 6
- výsledky kontroly jsou zaznamenány v tabulce č. 7

Tabulka č. 7 – kontrola výsledků pro regulaci

$D$	$d_{20}$	$q_{m40\%}$	$\beta$	$Re_D$	$Re_d$	$\Delta p$	$\psi_C$	$\psi_\varepsilon$
134,127	133,047	33,333	0,625	2,65E+06	7,50E+06	45,163	3	0,016

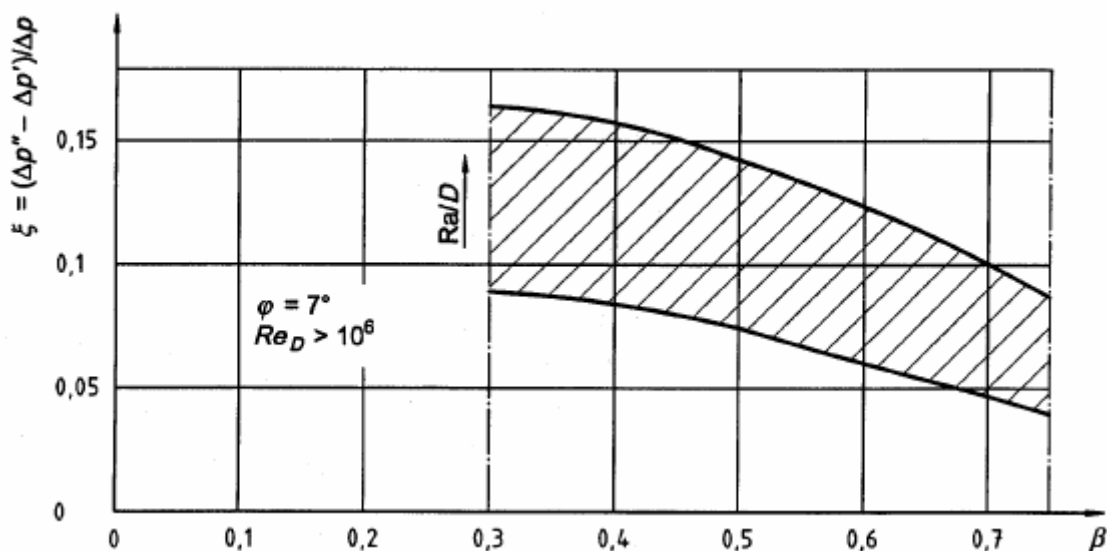
- diferenční tlak  $\Delta p$  určuje dolní hranici pro rozsah užitého zařízení pro měření diferenčního tlaku
- hodnoty  $\beta$  a  $Re_D$  nepřesahují hodnoty určené normou [2], tudíž bude Venturiho trubice s těmito vypočtenými parametry vhodná pro měření průtoku napájecí vody dle zadaných hodnot

### 7.4.3 Materiál Venturiho trubice pro měření průtoku přehřáté páry

- materiály vhodné pro měření průtoku přehřáté páry daných parametrů jsou tyto: oceli třídy 13Mo3 13CrMo44 14MoV63 10CrMo910
- povětšinou se materiál škrťícího orgánu volí stejný, jako materiál potrubí – v tomto případě se může použít některá z výše vypsanych ocelí

### 7.5 Výpočet trvalé tlakové ztráty ve Venturiho trubici

- pro výpočet trvalé tlakové ztráty se může použít Graf č. 1, který je určen pro Venturiho trubici, jejíž celkový úhel difuzoru je roven  $7^\circ$  a pro Reynoldsovo číslo potrubí větší, než  $10^6$
- šrafovaná část grafu představuje relativní tlakovou ztrátu Venturiho trubice
- hodnoty vyčtené z grafu jsou spíše orientační, avšak můžou se použít, jestliže není znám tlak, který vznikne za Venturiho trubicí po její instalaci do potrubního systému



Graf č. 1 – Relativní tlaková ztráta Venturiho trubice [2]

## **7.6 Návrh rozměrů Venturiho trubic**

- rozměry Venturiho trubic jsou určovány v rozmezích shodných s kapitolou 5.3

### **7.6.1 Návrh rozměrů Venturiho trubice pro měření průtoku napájecí vody**

- Venturiho trubice se bude navrhovat pouze pro diferenční tlak 60[kPa] a hmotnostní průtok 171,111[kg/s]
- Průměr hrdla –  $d_{20} = 144,321$  [mm]
- Průměr potrubí –  $D_{20} = 267,9$  [mm]
- délka Vstupního válce – 267,9[mm]
- délka Konfuzoru – 333,663 [mm]
- délka Hrdla – 144,321 [mm]
- Vrcholový úhel Konfuzoru -  $21^\circ \pm 1^\circ$
- Vrcholový úhel Difuzoru -  $7^\circ$
- zaoblení  $R_1$  – 400 [mm]
- zaoblení  $R_2$  – 520 [mm]
- zaoblení  $R_3$  – 1500 [mm]
- snímač diferenčního tlaku – Rosemount 3015S MULTIVARIABLE s rozsahem diferenčního tlaku  $\Delta p$  0,1 až 62 [kPa]

### **7.6.2 Návrh rozměrů Venturiho trubice pro měření průtoku přehřáté páry**

- Venturiho trubice se bude navrhovat pouze pro diferenční tlak 350 [kPa] a hmotnostní průtok 61,667[kg/s]
- Průměr hrdla –  $d_{20} = 134,127$  [mm]
- Průměr potrubí –  $D_{20} = 213$  [mm]
- délka Vstupního válce – 213 [mm]
- délka Konfuzoru – 212,95 [mm]
- délka Hrdla – 134,127 [mm]
- Vrcholový úhel Konfuzoru -  $21^\circ \pm 1^\circ$
- Vrcholový úhel Difuzoru -  $7^\circ$
- zaoblení  $R_1$  – 290 [mm]
- zaoblení  $R_2$  – 480 [mm]
- zaoblení  $R_3$  – 1500 [mm]
- snímač diferenčního tlaku – Yokogawa EJX910 MULTIVARIABLE s rozsahem diferenčního tlaku  $\Delta p$  40 až 400 [kPa]

## 7.7 Ukázka výpočtu měření průtoku napájecí vody v EES

- v této ukázce se počítá s těmito hodnotami:
- $\Delta p = 350$  [kPa]
- $q_m = 172,105$  [kg/s]
- zbylé hodnoty jsou vyčteny z tabulky č. 2 pro napájecí vodu

### 7.7.1 Ukázka zadávání rovnic v EES

- rovnice pro iterační výpočet se vkládají do EES stejným způsobem, který je vyobrazen na obrázku č. 7.2

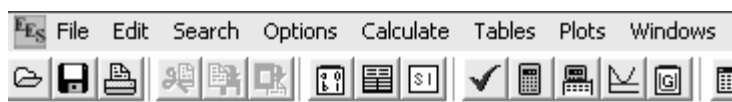


Obrázek č. 7.2 – Zadávání rovnic v EES



### 7.7.2 Ukázka zpřehlednění rovnic v EES

- pakliže se chceme přesvědčit, zda jsme rovnice správně zadali, pomůže nám k tomu nástroj „formatted equations“
- část zpřehlednění rovnic je ukázána na obrázku č. 7.3



zadané hodnoty

$$t_1 = 249 \text{ [C]}$$

$$p_1 = 22000 \text{ [kPa]}$$

$$q_m = 172,105 \text{ [kg/s]}$$

$$\alpha = 0,000013145 \text{ [1/K]}$$

$$D_{\text{PIPE},20} = 267,9 \text{ [mm]}$$

$$\Delta p = 350 \text{ [kPa]}$$

hodnoty součinitele prutoku a expanze

$$C = 1,01$$

$$\varepsilon = 1$$

prepocet prumeru

$$D_{\text{PIPE}} = D_{\text{PIPE},20} \cdot (1 + \alpha \cdot (t_1 - 20))$$

$$d_{\text{PP}} = D_{\text{PP},20} \cdot (1 + \alpha \cdot (t_1 - 20))$$

vlastni iteracni vypocet

$$\beta = \frac{d_{\text{PP}}}{D_{\text{PIPE}}}$$

$$\rho_1 = \rho(\text{'Steam}_{\text{IAPWS}}'; T=t_1; P=p_1)$$

$$\mu_1 = \text{Visc}(\text{'Steam}_{\text{IAPWS}}'; T=t_1; P=p_1)$$

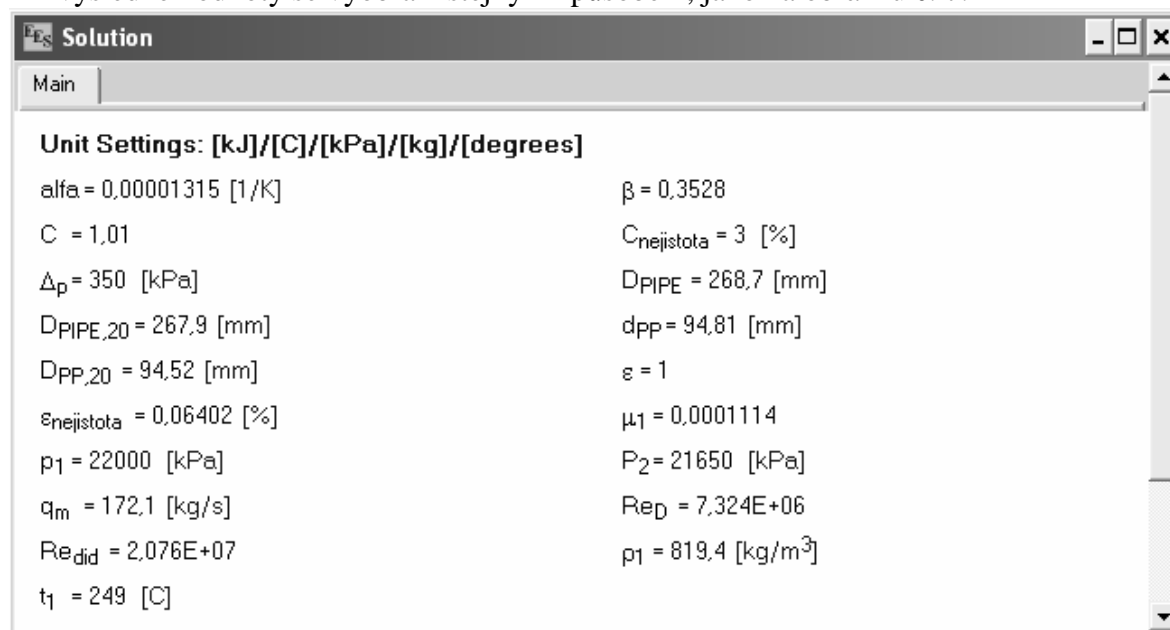
$$Re_D = \frac{4 \cdot q_m}{\pi \cdot \mu_1 \cdot \frac{D_{\text{PIPE}}}{1000}}$$

$$Re_{\text{did}} = \frac{Re_D}{\beta}$$

Obrázek č. 7.3 – Formatted equations v EES

### 7.7.3 Ukázka výsledků řešení v EES

- výsledné hodnoty se vyobrazí stejným způsobem, jako na obrázku č. 7.4



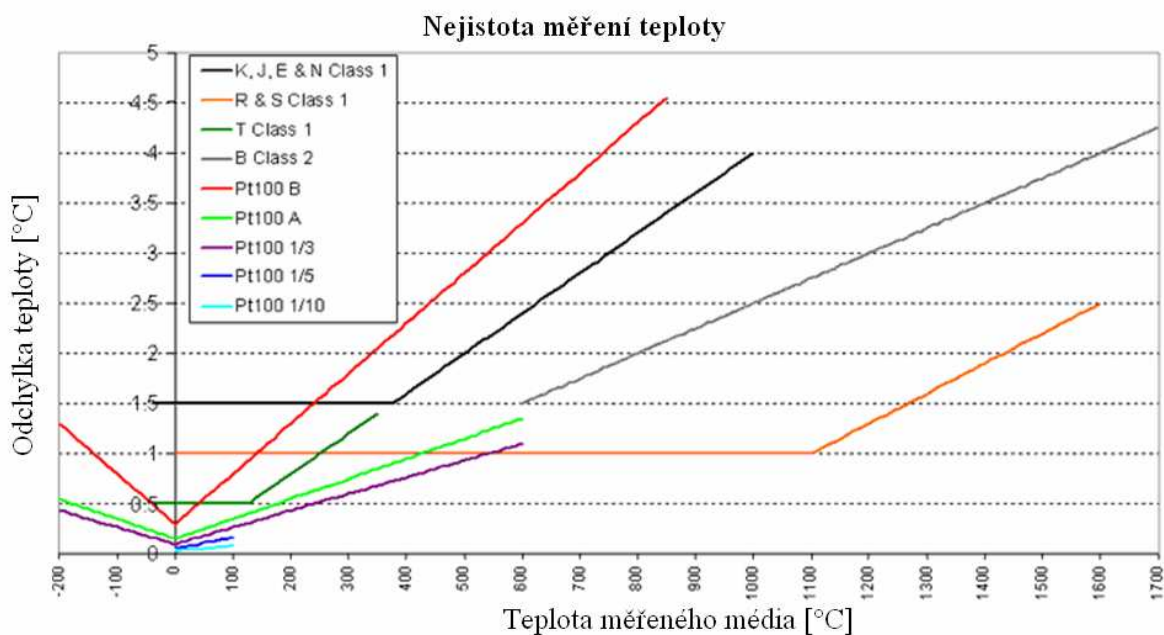
Obrázek č. 7.4 – Ukázka výsledků v EES

## 8 Posouzení vhodnosti termočlánku typu K a odporové sondy Pt 100

- principiálně jde o posouzení vlivu nepřesnosti měření teploty těchto dvou měřících zařízení na výkonu elektrárny

### 8.1 Měření termočlánkem typu K

- termočlánek se skládá ze dvou různorodých kovů, které se spojí do jednoho bodu
- jakmile se tento spoj zahřívá, nebo chladí, vzniká napětí souvztažné k teplotě
- termočlánek typu K pracuje od -200 do 1250 [°C]
- odchylku měření termočlánku zjistíme z grafu č. 2



- z grafu vyplývá, že odchylka měření termočlánku typu K (černá křivka) je pro teplotu páry 575[°C] rovna hodnotě 2,2 [°C]

$$t_{skut} = 575 \pm 2,2 \text{ [}^{\circ}\text{C]}$$

### 8.2 Měření odporovou sondou Pt 100

- Pt 100 jsou nejběžnější odporové sondy – při teplotě 0[°C] je odpor 100 [Ω]
- měření budeme provádět s odporovou sondou typu A, kvůli její vyšší přesnosti v daném rozsahu teplot
- odchylku odporové sondy třídy A zjistíme použitím vzorce č. 16

$$t_{skut} = t \pm (0,15 + 0,002|t|) \text{ [}^{\circ}\text{C]} \quad (16)$$

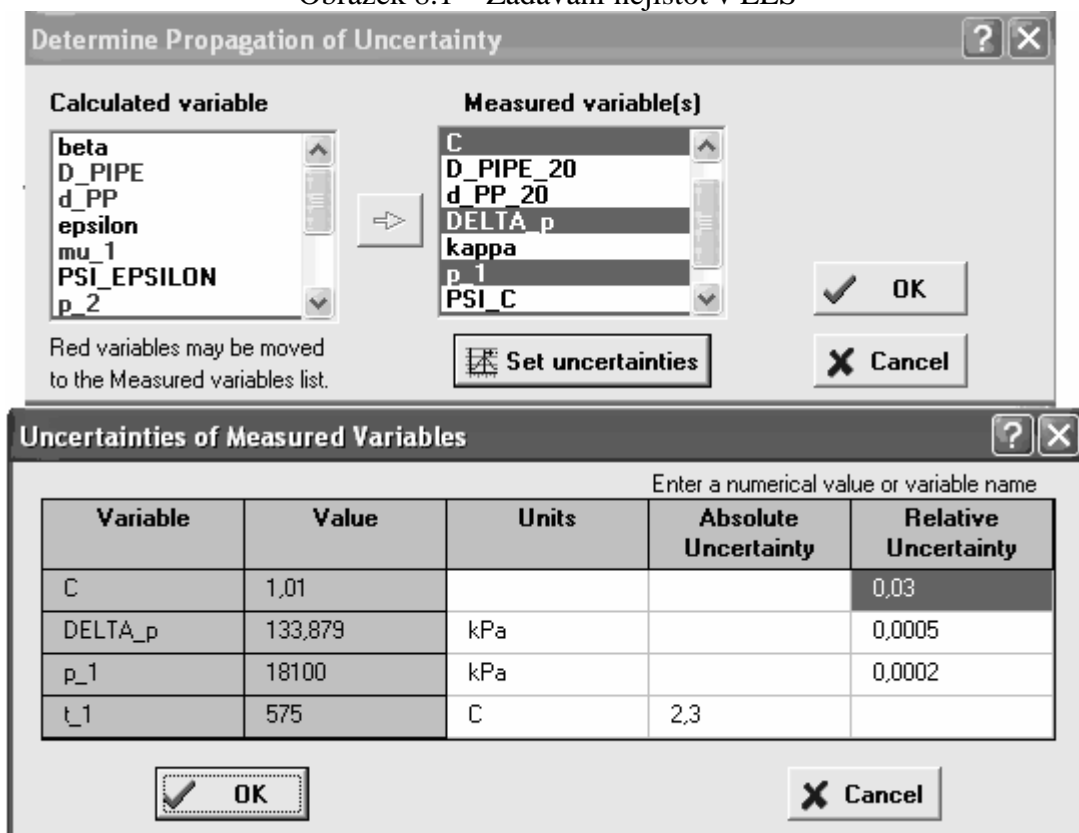
$$t_{skut} = 575 \pm (0,15 + 0,002 \cdot 575)$$

$$t_{skut} = 575 \pm 1,3 \text{ [}^{\circ}\text{C]}$$

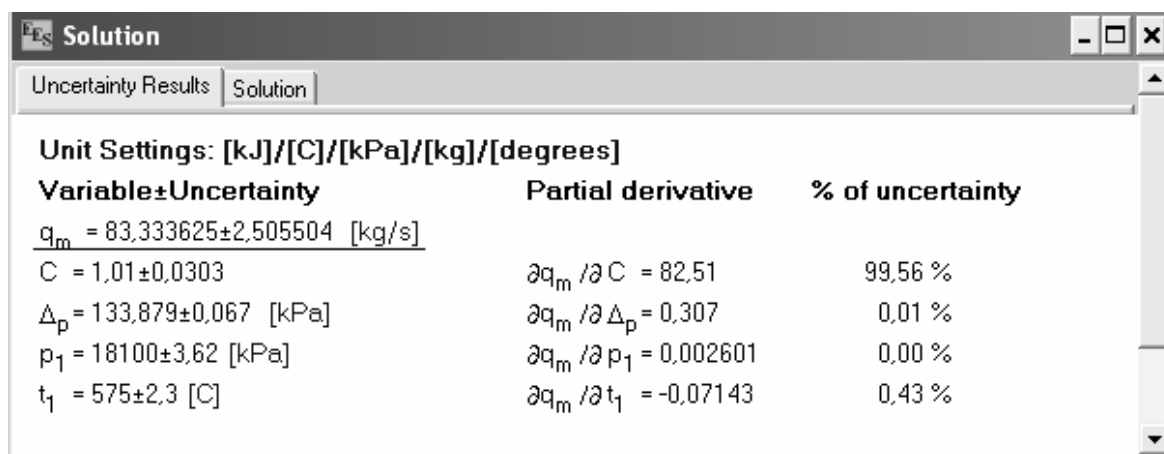
### 8.3 Celková nejistota hmotnostního průtoku

- nejistota hmotnostního průtoku se dá vypočítat programem EES pomocí funkce Uncertainly propagation
- zadávání nejistot do funkce je ukázáno na obrázku č. 8.1

Obrázek 8.1 – Zadávání nejistot v EES



- nejistota Součinitele průtoku je dle příslušné normy [2] rovna 3[%]
- nejistota měření diferenčního tlaku je 0,05[%]
- nejistota měření statického tlaku je 0,02[%]
- nejistota měření teploty je pro termočlánek typu K a pro odporovou sondu Pt 100 odlišná, viz kapitoly 8.1 a 8.2
- výsledné hodnoty nejistoty průtoku se zobrazí způsobem, který je znázorněn na obrázku č. 8.2



Obrázek č. 8.2 – Vyobrazení výsledků nejistot v EES

#### 8.4 Závěrečné porovnání Termočlánu typu K a odporové sondy Pt 100

- výsledné porovnání nejistot hmotnostního průtoku je zaznamenáno v tabulce č. 8

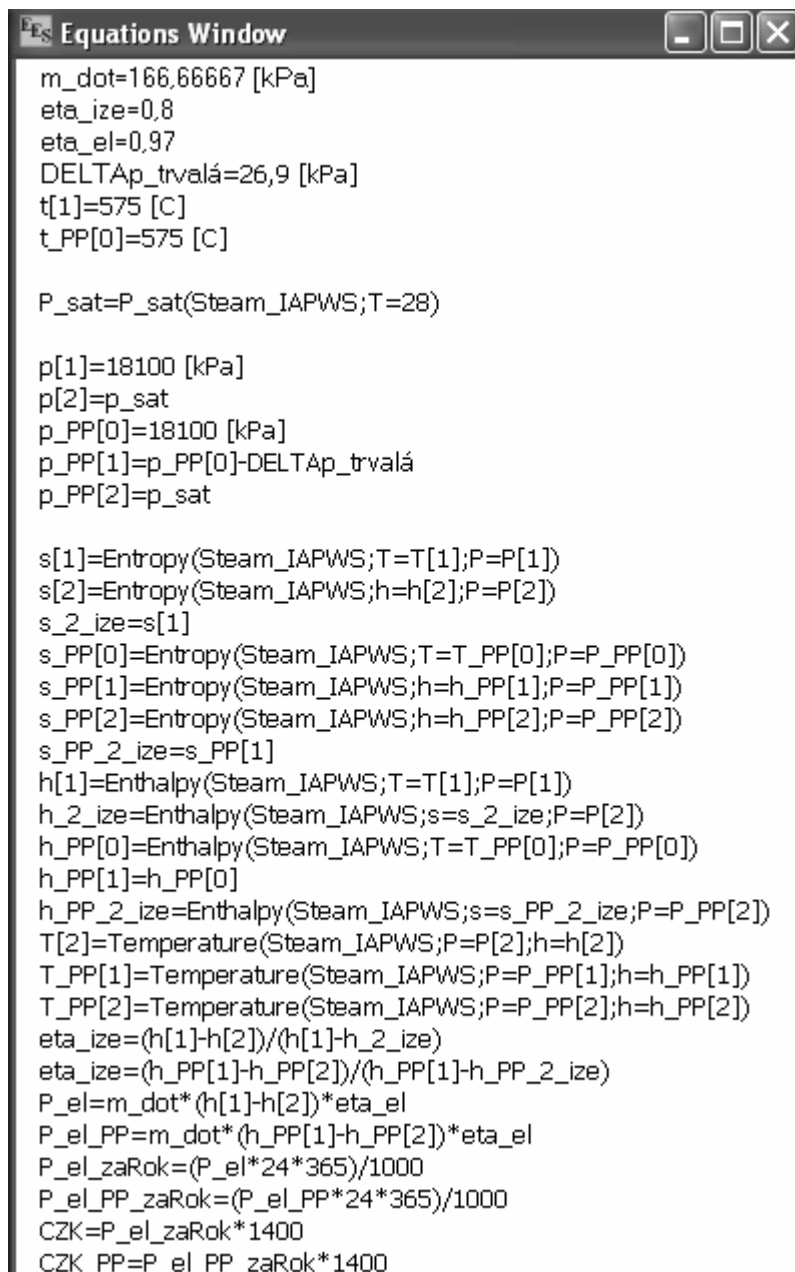
Tabulka č. 8 – porovnání nejistot hmotnostního průtoku

Teplotní snímač	Absolutní nejistota	Výsledný $q_m \pm$ nejistota
	[°C]	[kg/s]
Termočlánek K	2,3	83,332±2,506
Pt100	1,3	83,332±2,502

- hodnota nejistoty termočlánu typu K je o  $\pm 0,002$  [kg/s] větší, než u odporové sondy

## 9 Ekonomické porovnání

- cílem je porovnání výkonu elektrárny pro seškrcení na 350 [kPa] a pro stav, kdy nedojde k žádnému seškrcení
- výpočet výkonu elektrárny s danými parametry je uveden na obrázku č. 9.1, který zobrazuje způsob zadání rovnic do EES



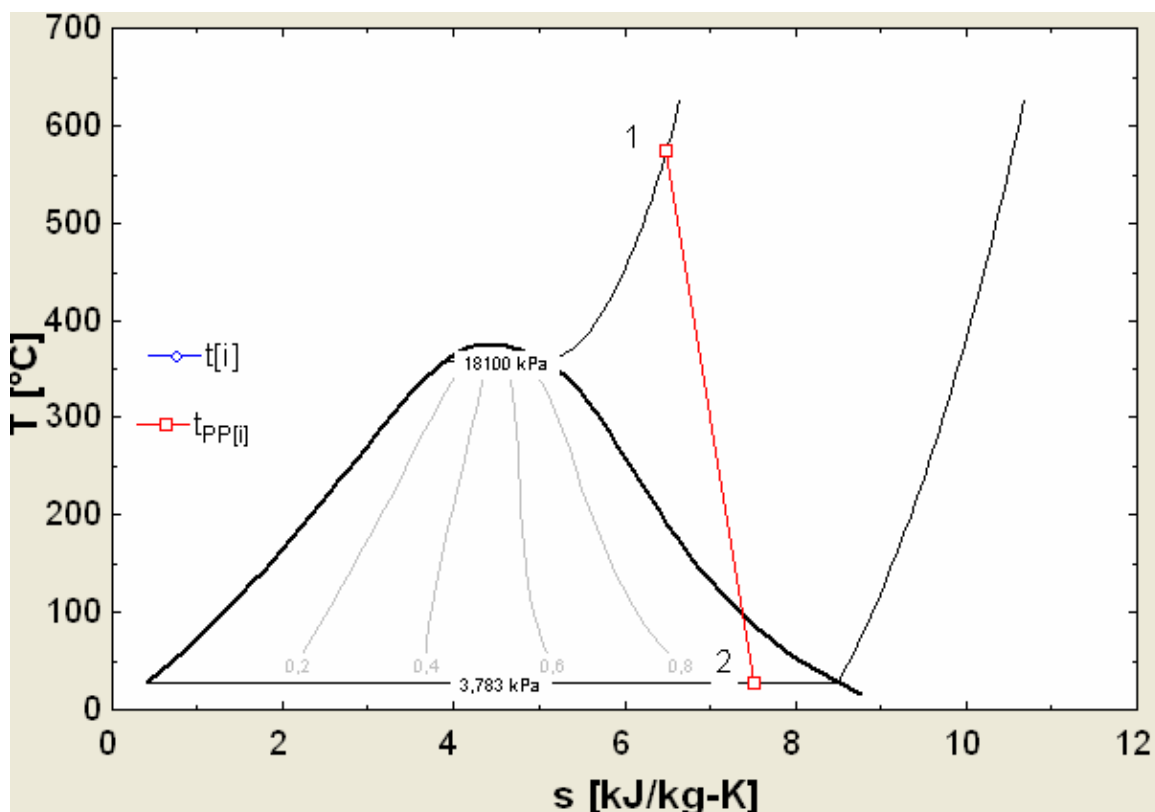
```
Equations Window
m_dot=166,66667 [kPa]
eta_ize=0,8
eta_el=0,97
DELTAp_trvala=26,9 [kPa]
t[1]=575 [C]
t_PP[0]=575 [C]

P_sat=P_sat(Steam_IAPWS;T=28)

p[1]=18100 [kPa]
p[2]=p_sat
p_PP[0]=18100 [kPa]
p_PP[1]=p_PP[0]-DELTAp_trvala
p_PP[2]=p_sat

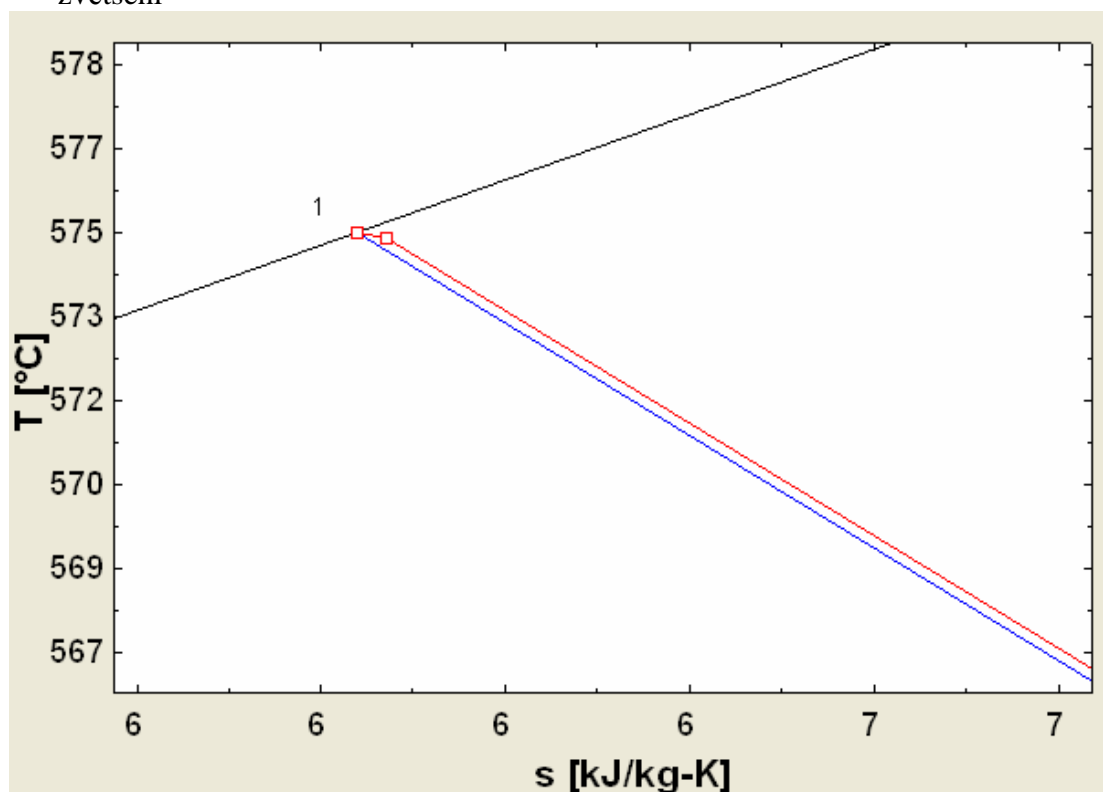
s[1]=Entropy(Steam_IAPWS;T=T[1];P=P[1])
s[2]=Entropy(Steam_IAPWS;h=h[2];P=P[2])
s_2_ize=s[1]
s_PP[0]=Entropy(Steam_IAPWS;T=T_PP[0];P=P_PP[0])
s_PP[1]=Entropy(Steam_IAPWS;h=h_PP[1];P=P_PP[1])
s_PP[2]=Entropy(Steam_IAPWS;h=h_PP[2];P=P_PP[2])
s_PP_2_ize=s_PP[1]
h[1]=Enthalpy(Steam_IAPWS;T=T[1];P=P[1])
h_2_ize=Enthalpy(Steam_IAPWS;s=s_2_ize;P=P[2])
h_PP[0]=Enthalpy(Steam_IAPWS;T=T_PP[0];P=P_PP[0])
h_PP[1]=h_PP[0]
h_PP_2_ize=Enthalpy(Steam_IAPWS;s=s_PP_2_ize;P=P_PP[2])
T[2]=Temperature(Steam_IAPWS;P=P[2];h=h[2])
T_PP[1]=Temperature(Steam_IAPWS;P=P_PP[1];h=h_PP[1])
T_PP[2]=Temperature(Steam_IAPWS;P=P_PP[2];h=h_PP[2])
eta_ize=(h[1]-h[2])/(h[1]-h_2_ize)
eta_ize=(h_PP[1]-h_PP[2])/(h_PP[1]-h_PP_2_ize)
P_el=m_dot*(h[1]-h[2])*eta_el
P_el_PP=m_dot*(h_PP[1]-h_PP[2])*eta_el
P_el_zarok=(P_el*24*365)/1000
P_el_PP_zarok=(P_el_PP*24*365)/1000
CZK=P_el_zarok*1400
CZK_PP=P_el_PP_zarok*1400
```

Obrázek č. 9.1 – ukázka výpočtu výkonu elektrárny v EES



Graf č. 3 – T-s diagram

- v Grafu č. 3 jsou pro ukázkou zakresleny průběhy teplot v T-s diagramu
- výsledky výpočtů jsou uvedeny v tabulce č. 10
- rozdíl mezi jednotlivými křivkami je nepatrný, proto je v grafu č. 4 vyobrazen ve zvětšení



Graf č. 4 – rozdíl křivek

- výsledky výpočtů výkonu elektrárny pro dané varianty jsou zaznamenány v tabulce č. 9

Tabulka č. 9 – výsledky výpočtů výkonu elektrárny

	$\Delta p$	$\Delta \omega$	$P_{el}$	$P_{el}/rok$	$P_{el}/CZK$
	[Kpa]	[Kpa]	[MW]	[MWh]	[Kč/rok]
<b>Se seškrcením (pp)</b>	350	26,9	199,028	1743488	2440882770
<b>Bez seškrcení</b>	0	-	199,052	1743698	2441177802
<b>Rozdíl</b>	-	-	0,024	210	295032

Kde

$P_{el}$  – elektrický výkon

$P_{el}/rok$  – elektrický výkon za rok

$P_{el}/CZK$  – elektrický výkon za rok v Kč

- v tabulce č. 10 se v ekonomickém porovnání uvažuje i celková nejistota hmotnostního průtoku, včetně dvou variant měření teploty, pomocí Termočlánek typu K a odporové sondy Pt 100

<b>Varianta se seškrcením</b>	<b>Termočlánek typu K</b>	
	<b>P/rok [MWh]</b>	<b><math>P_{el}/CZK</math> [mil. Kč/rok]</b>
	1743488 ± 52410,088	2441 ± 73,377
	<b>Odporová sonda Pt 100 A</b>	
	<b>P/rok [MWh]</b>	<b><math>P_{el}/CZK</math> [mil. Kč/rok]</b>
	1743488 ± 52343,033	2441 ± 73,281
<b>Varianta bez seškrcení</b>	<b>Termočlánek typu K</b>	
	<b>P/rok [MWh]</b>	<b><math>P_{el}/CZK</math> [mil. Kč/rok]</b>
	1743698 ± 52416,401	2441 ± 73,377
	<b>Odporová sonda Pt 100 A</b>	
	<b>P/rok [MWh]</b>	<b><math>P_{el}/CZK</math> [mil. Kč/rok]</b>
	1743698 ± 52349,338	2441 ± 73,281



## 10 Závěr

V úvodní teoretické části bakalářské práce jsou shrnuty nejčastěji používané způsoby měření průtoku. Zvláštní důraz je kladen na měření pomocí škrtících orgánů. Venturiho trubice se ukázala jako méně přesný škrtící orgán, avšak vyznačuje se nejmenší tlakovou ztrátou. Proti Venturiho trubici hovoří rovněž i její vysoká cena.

Stěžejním úkolem bakalářské práce bylo navrhnout Venturiho trubice měření průtoku napájecí vody a přehřáté páry daných parametrů. Celá práce vychází z normy pro Venturiho trubice ČSN EN ISO 5167 – 4. Návrh trubice pro parametry napájecí vody, při diferenčním tlaku 60[kPa], splnil všechny podmínky stanovené normou. Průměr hrdla trubice je v tomto případě  $d_{20} = 144,321[\text{mm}]$ . Výrobní výkres je uveden v příloze č. 1. Návrh trubice pro parametry přehřáté páry, při diferenčním tlaku 350 [kPa], rovněž splnil všechny podmínky stanovené normou. Průměr hrdla trubice je v tomto případě  $d_{20} = 134,047 [\text{mm}]$ .

Při porovnání měření teplot pomocí termočlánku typu K a odporové sondy Pt 100 bylo třeba zjistit celkovou nejistotu hmotnostního průtoku. Sem se musely započítat nejistoty všech měřených veličin. Odporová sonda ve výsledku měřila přesněji, když měla v konečném výkonu vypočítanou nejistotou  $\pm 73,281[\text{Kč/rok}]$ . Pomocí termočlánku typu K se konečný výsledek vyznačoval nejistotou ve výši  $\pm 73,377 [\text{Kč/rok}]$

V dalším bodu bakalářské práce se srovnával dopad seškracení, čili tlakové ztráty, na výrobu elektřiny. Byly zvoleny dvě varianty, se seškracením a bez seškracení. Vysoká tlaková ztráta, která vzniká právě seškracením, způsobuje nižší účinnost parního cyklu, jelikož přehřátá pára vstupuje do turbíny s nižším tlakem. Venturiho trubice při seškracení 350[kPa] způsobí ekonomickou ztrátu 295032 [Kč/rok].

**Poděkování**

Děkuji vedoucímu bakalářské práce ing. Michal Stáňa PhD. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé bakalářské práce.

## 11 Seznam použité literatury

- [1] ČSN EN ISO 5167-1, Měření průtoku tekutin pomocí snímačů diferenčního tlaku vložených do zcela zaplněného potrubí kruhového průřezu – Část 1: Obecné principy a požadavky, Český normalizační institut, 2003
- [2] ČSN EN ISO 5167-4, Měření průtoku tekutin pomocí snímačů diferenčního tlaku vložených do zcela zaplněného potrubí kruhového průřezu – Část 4: Venturiho trubice, Český normalizační institut, 2003
- [3] <http://voda.tzb-info.cz> – principy měření průtoku
- [4] [www.spiraxsarco.com](http://www.spiraxsarco.com) – adiabatický exponent
- [5] [www.yokogawa.com](http://www.yokogawa.com) – měřicí přístroje
- [6] [www.mattech.cz](http://www.mattech.cz) – měření průtoku
- [7] JANALÍK, Jaroslav. Měření tekutinových mechanismů [online]. Ostrava: 1995  
Dostupné na: [http://www.338.vsb.cz/PDF/Mereni\\_tek\\_mech.pdf](http://www.338.vsb.cz/PDF/Mereni_tek_mech.pdf)

## 12 Seznam příloh

- Příloha 1 – Návrh Venturiho trubice pro napájecí vodu
- Příloha 2 – Návrh Venturiho trubice pro přehřátou páru